



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS



**ESTUDO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA PARA
SATÉLITES COM ÊNFASE EM NANOSATÉLITES DA CLASSE
CUBESATS E DESENVOLVIMENTO DO BALANÇO DE POTÊNCIA
DO NANOSATC-BR2.**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBIC/INPE - CNPq/MCTIC)**

Alex Müller

(UFSM – Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCTIC)

E-mail: alexmuller1997@gmail.com

Dr. Nelson Jorge Schuch

Orientador

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais

CRCRS/COCRE/INPE – MCTIC

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

INPE - MCTIC

E-mail: njschuch@gmail.com

Julho de 2019



DADOS DE IDENTIFICAÇÃO

Título:

**ESTUDO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA PARA
SATÉLITES COM ÊNFASE EM NANOSSATÉLITES DA CLASSE
CUBESATS E DESENVOLVIMENTO DO BALANÇO DE POTÊNCIA
DO NANOSATC-BR2.**

Processo: 135876/2018-4

Aluno Bolsista no período de Agosto/18 a Julho/19

Alex Müller

Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica

Centro de Tecnologia – CT/UFSM

Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

Orientador:

Dr. Nelson Jorge Schuch

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRCRS/COCRE/INPE – MCTIC

Co-Orientador:

Dr. Eng. Otávio S. C. Durão

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/MCTIC

Colaboradores:

Alan Pitthan Couto

Acadêmico do Curso de Engenharia Aeroespacial da UFSM

Artur Gustavo Slongo

Acadêmico do Curso de Engenharia Aeroespacial da UFSM

Lorenzo Quevedo Mantovani

Acadêmico do Curso de Engenharia Aeroespacial de UFSM

Rodrigo Passos Marques

Engenheiro Mecânico - UFSM



Locais de Trabalho/Execução do Projeto:

- Laboratório de Eletrônica - CRCRS/COCRE/INPE – MCTIC

Trabalho desenvolvido no âmbito da Parceria e Convênio: INPE/MCTIC – UFSM, pelo Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT – UFSM.



AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente ao meu Mentor e Orientador Dr. Nelson Jorge Schuch, Pesquisador Titular Sênior III do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRCRS/COCRE/INPE-MCTIC, pela dedicação, ajuda e suporte me auxiliando no crescimento pessoal e profissional. Também agradeço a todos os membros e colaboradores do Programa NANOSATC-BR, Desenvolvimento de CubeSats pelo apoio e incentivo sempre presente.

A todos os servidos do CRCRS/COCRE/INPE – MCTIC deixo meu agradecimento pela atenção e apoio, assim como disponibilização da infraestrutura.

Deixo um agradecimento especial ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica – PIBIC/INPE – CNPq/MCTIC, assim como ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq/MCTIC pela oportunidade propiciada.

Aos meus familiares agradeço pelo apoio e motivação que sempre recebi para prosseguir nos estudos e atividades tanto pessoais como profissionais.



Relatório Final de Atividades

Estudante

Alex Müller

Endereço para acessar este espelho: dgp.cnpq.br/dgp/espelhorh/3285846372955261

Dados Gerais

Nome em citações bibliográficas: MÜLLER, A.

Nível de Treinamento: Graduação

Áreas de atuação:

- Microeletrônica
- Satélites e Outros Dispositivos Aeroespaciais
- Tecnologia Aeroespacial

Bolsista CNPq:

- IC

Última atualização do Currículo Lattes: 24/11/2018

Homepage:

Grupos de pesquisa em que atua

Nome do grupo	Instituição
Clima Espacial, Interações Sol -Terra, Magnetosferas, Geoespaço, Geomagnetismo: Nanosatélites	INPE

Linhas de pesquisa em que atua

Linha de pesquisa	Nome do grupo
DESENVOLVIMENTO DE NANOSATÉLITES - CubeSats: NANOSATC-BR	Clima Espacial, Interações Sol -Terra, Magnetosferas, Geoespaço, Geomagnetismo: Nanosatélites

Orientadores participantes de grupos de pesquisa

Orientador	Grupo de pesquisa
Nelson Jorge Schuch	Clima Espacial, Interações Sol -Terra, Magnetosferas, Geoespaço, Geomagnetismo: Nanosatélites



RESUMO

O Relatório Final de Projeto de Iniciação Científica – PIBIC/INPE-CNPq/MCTIC, apresenta os estudos e atividades realizadas por Alex Müller, desenvolvidas pelo bolsista, no período de Agosto de 2018 até Julho de 2019, referentes ao Projeto “ESTUDO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA PARA SATÉLITES COM ÊNFASE EM NANOSATÉLITES DA CLASSE CUBESATS E DESENVOLVIMENTO DO BALANÇO DE POTÊNCIA DO NANOSATC-BR2”.

O trabalho contava com os objetivos de estudar os sistemas elétricos de potência de satélites, com ênfase em nanosatélites da classe CubeSats, projetando conversores para condicionar a energia das baterias de nanosatélites em níveis de tensão usuais nos barramentos, estudar a geração de energia elétrica em ambiente espacial, desenvolver o balanço de potência do NANOSATC-BR2

Para as etapas de estudo sobre o sistema elétrico de potência e geração de energia elétrica em ambiente espacial foi realizada uma análise bibliográfica sobre sistemas de potência espaciais, análises de resultados do código desenvolvido em Matlab e estudos sobre as *payloads* do NANOSATC-BR2. Para a etapa do balanço de potência foi realizado um estudo do consumo de potência dos componentes elétricos e eletrônicos que integram o NANOSATC-BR2, juntamente com o estudo da geração de energia elétrica em ambiente espacial.



Sumário

LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELA	9
INTRODUÇÃO	10
CAPÍTULO 1.....	12
PROGRAMA NANOSATC-BR, DESENVOLVIMENTO DE CUBESATS	12
1.1. INTRODUÇÃO	12
1.2. NANOSSATÉLITE NANOSATC-BR1	12
1.3. PROJETO NANOSATC-BR2	13
CAPÍTULO 2.....	15
COMPOSIÇÃO ELÉTRICA E ELETRÔNICA DO NANOSATC-BR2.....	15
2.1. INTRODUÇÃO	15
2.2. COMPONENTES DO BUS DO NANOSATC-BR2	15
2.3. CARGAS ÚTEIS QUE COMPÕEM O PAYLOAD DO NANOSATC-BR2	18
CAPÍTULO 3.....	21
CONDICIONAMENTO DE ENERGIA	21
3.1. CONVERSOR BUCK.....	21
3.1.1. Dimensionamento do Conversor Buck.....	26
3.2. CONVERSOR BOOST	34
CAPÍTULO 4.....	40
FONTE DE ENERGIA ELÉTRICA EM AMBIENTE ESPACIAL.....	40
4.1. ENERGIA FOTOVOLTAICA.....	40
4.2. CÉLULA FOTOVOLTAICA	41
4.3. GERAÇÃO DE ENERGIA POR SOFTWARE.....	42
CAPÍTULO 5.....	455
BALANÇO DE POTENCIA	455
CAPÍTULO 6.....	488
PRINCIPAIS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS	488
CAPÍTULO 7.....	49
CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: FOTO DO MODELO DE ENGENHARIA DO CUBESAT NANOSATC-BR1 NO LABORATÓRIO DE INTEGRAÇÃO E TESTES DE NANOSSATÉLITES (LITN/CRS-INPE-MCTI).....	13
FIGURA 2: FOTO DO MODELO DE ENGENHARIA DO CUBESAT NANOSATC-BR1 NO LABORATÓRIO DE INTEGRAÇÃO E TESTES (LIT/INPE-MCTI)	14
FIGURA 3: EPS DO NANOSATC-BR2	16
FIGURA 4: REPRESENTAÇÃO DOS PONTOS NECESSÁRIOS PARA A O POSICIONAMENTO DE UM SATÉLITE NA ÓRBITA ESPECIAL	19
FIGURA 5: REPRESENTAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO DOS MAGNETÔMETROS XEN 1210 PARA A REALIZAÇÃO DE MEDIÇÕES NOS EIXOS X,Y,Z.....	20
FIGURA 6: DIAGRAMA DE CIRCUITO DO CONVERSOR ABAIXADOR DE TENSÃO.....	21
FIGURA 7: CIRCUITO EQUIVALENTE DA PRIMEIRA ETAPA DE OPERAÇÃO.....	22
FIGURA 8 CIRCUITO EQUIVALENTE DA SEGUNDA ETAPA DE OPERAÇÃO.....	23
FIGURA 9: SEQUÊNCIA DE FORMAS DE ONDAS NOS PRINCIPAIS COMPONENTES.....	26
FIGURA 10: TENSÃO DE SAÍDA DO CONVERSOR E A CORRENTE DO INDUTOR COMPROVANDO O MODO DE CONDUÇÃO CCM	28
FIGURA 11: ESCOLHA DO NÚCLEO IDEAL PARA O INDUTOR DE TECNOLOGIA KOOL MM®.....	29
FIGURA 12: SIMULAÇÃO DA TENSÃO DE SAÍDA (AZUL) E A CORRENTE DO INDUTOR (VERMELHO) NO CONVERSOR BUCK2.....	32
FIGURA 13: ESCOLHA DO NÚCLEO IDEAL PARA O INDUTOR DO CONVERSOR BUCK2.....	33
FIGURA 14: CONVERSOR BOOST ESTUDADO	35
FIGURA 15: PRIMEIRA ETAPA DE OPERAÇÃO – CARREGAMENTO DO INDUTOR L	36
FIGURA 16: SEGUNDA ETAPA DE OPERAÇÃO – ALIMENTAÇÃO DA CARGA PELA CORRENTE DO INDUTOR....	37
FIGURA 17: ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DA RADIAÇÃO SOLAR.....	41
FIGURA 18: REPRESENTAÇÃO DO CIRCUITO EQUIVALENTE DA CÉLULA FOTOVOLTAICA.....	42
FIGURA 19: GERAÇÃO DE POTÊNCIA EM CADA FACE.....	42
FIGURA 20: GERAÇÃO DE POTÊNCIA TOTAL EM FUNÇÃO DO TEMPO.....	43



LISTA DE TABELA

TABELA 1: CARACTERÍSTICAS DO CONVERSOR BUCK1.....	27
TABELA 2: CARACTERÍSTICAS DO CONVERSOR BUCK2.....	27
TABELA 3: TABELA RESUMO DO PROJETO DO INDUTOR PARA O CONVERSOR BUCK1	30
TABELA 4: RESUMO DO PROJETO DO INDUTOR DE NÚCLEO TOROIDAL DO CONVERSOR BUCK2.	34
TABELA 5: GERAÇÃO DE POTÊNCIA POR SIMULAÇÃO.....	43
TABELA 6: BALANÇO DE POTÊNCIA SEM OS AJUSTES SUGERIDOS.	45
TABELA 7: BALANÇO DE POTÊNCIA COM AS CORREÇÕES INICIAS.	46
TABELA 8: BALANÇO DE POTÊNCIA COM AS CORREÇÕES FINAIS.	47



INTRODUÇÃO

As atividades realizadas pelo bolsista no projeto “**ESTUDO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA PARA SATÉLITES COM ÊNFASE EM NANOSSATÉLITES DA CLASSE CUBESATS E DESENVOLVIMENTO DO BALANÇO DE POTÊNCIA DO NANOSATC-BR2**” (Processo nº135876/2018-4) com vigência de Agosto de 2018 até Julho de 2019 estão descritas neste relatório. As atividades foram realizadas pelo bolsista **Alex Müller**, graduando do curso de Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), bolsista do programa PIBIC/INPE – CNPq/MCTIC no CRCRS/COCRE/INPE-MCTIC.

O Programa NANOSATC-BR, Desenvolvimento de CubeSats possui dois projetos: NANOSATC-BR1 e NANOSATC-BR2. Ambos os projetos são constituídos por nanossatélites de padrão CubeSat, adquiridos da empresa ISL/ISIS. O NANOSATC-BR1 está operacional no espaço a mais de quatro anos. O NANOSATC-BR2 ainda não possui data de lançamento definida.

O objetivo do Programa de Pesquisa foi analisar todos os componentes elétricos e eletrônicos do sistema elétrico de potência do NANOSATC-BR2, estudar a geração de energia elétrica em ambiente espacial e comparar com a geração simulado em Matlab, para com os resultados desses estudos desenvolver o balanço de potência do NONASATC-BR2 e validar o código desenvolvido em Matlab.

O Relatório foi dividido em 6 Capítulos:

O Capítulo 1 discute sobre o Programa NANOSATC-BR, Desenvolvimento de CubeSats apresentando os objetivos, assim como a visão geral do mesmo.

O Capítulo 2 apresenta, detalhadamente, os componentes do sistema elétrico de potência do NANOSATC-BR2.

O Capítulo 3 apresenta o estudo mais detalhado sobre o sistema elétrico de potência no âmbito de condicionamento de energia e apresenta o dimensionamento de um conversor rebaixador de tensão para os circuitos do NANOSATC-BR2.

O Capítulo 4 apresenta o estudo realizado sobre as fontes geradoras de energia elétrica em ambiente espacial e geração simulada através de software.



Relatório Final de Atividades

O Capítulo 5 apresenta o balanço de potência desenvolvido para o NANOSATC-BR2 teórico e com os dados de simulação.

O Capítulo 6 relata as principais atividades desenvolvidas.

O Capítulo 7 envolve as considerações finais do bolsista sobre o Projeto realizado e desenvolvido no período da vigência da bolsa.



CAPÍTULO 1

PROGRAMA NANOSATC-BR, DESENVOLVIMENTO DE CUBESATS

1.1. Introdução

O Programa NANOSATC-BR, Desenvolvimento de CubeSats é uma parceria entre o INPE/MCTIC e a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). O Programa possui dois nanossatélites: NANOSATC-BR1 e NANOSATC-BR2. Ambos são nanossatélites de padrão CubeSat (cada unidade mínima em forma de cubo possui arestas de 10 centímetros).

O programa possui os seguintes objetivos:

- Capacitação tecnológica nas áreas de ciência, tecnologia e engenharia;
- Capacitação de Recursos Humanos, especialmente estudantes de graduação no âmbito de ciências espaciais no que abrange as etapas de uma missão espacial (planejamento, desenvolvimento, testes, lançamento, operação e monitoramento);
- Capacitação Tecnológica das Instituições parceiras do Programa, as quais podem ter um desenvolvimento das áreas de ciências, engenharias e tecnologia;
- Estudo e aquisição de dados da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS) além de eletrojatos equatoriais.

1.2. NANOSSATÉLITE NANOSATC-BR1

O primeiro nanossatélite do Programa, o NANOSATC-BR1 (NCBR1) é um nanossatélite de tamanho 1U (uma unidade CubeSat), de massa igual a 0.96825 quilos. É o primeiro Nanossatélite Científico Brasileiro tendo sido lançado em 2014, estando até hoje em operação (mais de quatro anos em operação). O NCBR1 possui como missão científica a coleta de dados da AMAS utilizando um magnetômetro e missão tecnológica o teste e validação de componentes eletrônicos tais como: *FPGA* desenvolvido pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e *Drivers On/Off* desenvolvidos pela Santa Maria Design House (SMDH).

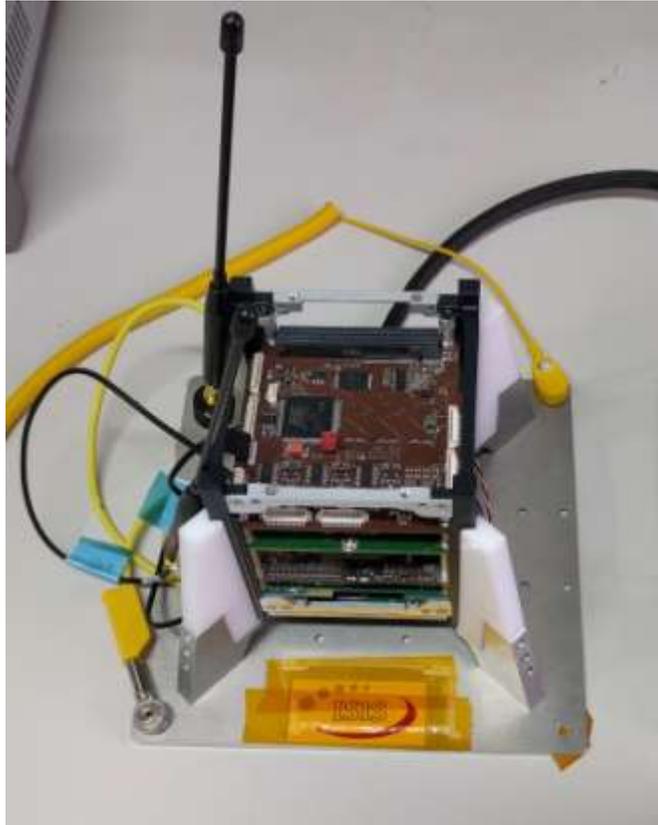


Figura 1: Foto do modelo de engenharia do CubeSat NANOSATC-BR1 no Laboratório de Integração e Testes de Nanossatélites (LITN/CRCRS/COCRE/INPE-MCTIC)

1.3. Projeto NANOSATC-BR2

O projeto NANOSATC-BR2 (NCBR2) consiste do segundo nanossatélite do programa, possuindo dimensões de duas unidades CubeSat (2U) e massa de aproximadamente 2 quilos. O modelo de engenharia do NCBR2 atualmente se encontra em fase de teste para futuro lançamento (janela de lançamento ainda não determinada).

Assim como o modelo anterior, o NCBR2 conta com missões científicas e tecnológicas. Como missão científica busca coletar dados da Ionosfera através de uma sonda de Langmuir além de dados da AMAS através de dois magnetômetros.

Como missão tecnológica, busca testar e validar os seguintes componentes: Dois FPGAs, um CI (Circuito Integrado) além de um sistema de determinação de atitude (possuindo tripla redundância).



Figura 2: Foto do modelo de engenharia do CubeSat NANOSATC-BR1 no Laboratório de Integração e Testes (LIT/INPE-MCTI)

CAPÍTULO 2

COMPOSIÇÃO ELÉTRICA E ELETRÔNICA DO NANOSATC-BR2

2.1. Introdução

Um satélite artificial consiste de vários sistemas desenvolvidos para uma determinada missão espacial. Os mais simples aos mais complexos requerem sistemas comuns que são classificados em dois grupos, o *payload*, que é a carga útil a ser embarcada no satélite e o *BUS* que são os sistemas úteis e vitais ao satélite, como o suprimento de energia fornecido pelo *Energy Power Supply (EPS)*, sistema de telecomunicações, o computador de bordo, os sensores e os painéis solares. (PATEL, M. R., 2005)

O *BUS* é responsável por gerar, armazenar e distribuir a energia para os outros subsistemas, receber e processar comandos da estação terrena e enviar dados coletados pelo satélite.

O *Payload* consiste nos componentes eletrônicos que cumprem os objetivos da missão, responsáveis pelo sensoriamento em ambiente espacial, como Magnetômetros, Sonda de Langmuir, FPGA, Chips ASIS e determinação da atitude.

O meio de geração de energia presente no NCBR2 são as células solares que consistem em células fotovoltaicas presas ao corpo do nanossatélite, esse assunto é minuciosamente descrito no Capítulo 4.

2.2. Componentes do *BUS* do NANOSATC-BR2

Os componentes do *BUS* são subsistemas responsáveis pela vitalidade do satélite, descrevem a função de geração, armazenamento e condicionamento de energia, bem como a transmissão de dados do satélite e a recepção de telecomandos da estação terrena.

Energy Power Supply (EPS)

O *EPS* caracteriza-se por ser o sistema responsável pela geração, armazenamento, condicionamento, controle e a distribuição da energia elétrica para todos os sistemas do satélite. (PATEL, 2005)

Os componentes básicos para esse sistema são os acumuladores de energia, como a bateria de Níquel-Cadmio; painéis solares; reguladores de tensão para a carga das baterias; barramento de energia; chaveamento da carga; condutores utilizados para fazer as conexões elétricas dos componentes e proteção com o uso de fusíveis.

A fonte é composta por três conversores *boost* na entrada dos painéis fotovoltaicos e apresenta dois conversores *buck* para o condicionamento das tensões de saída em 5 e 3,3 Volts, esses conversores serão detalhados no Capítulo 3. O *EPS* consome uma potência de 0,249 W para a alimentação de todos os seus subsistemas elétricos.

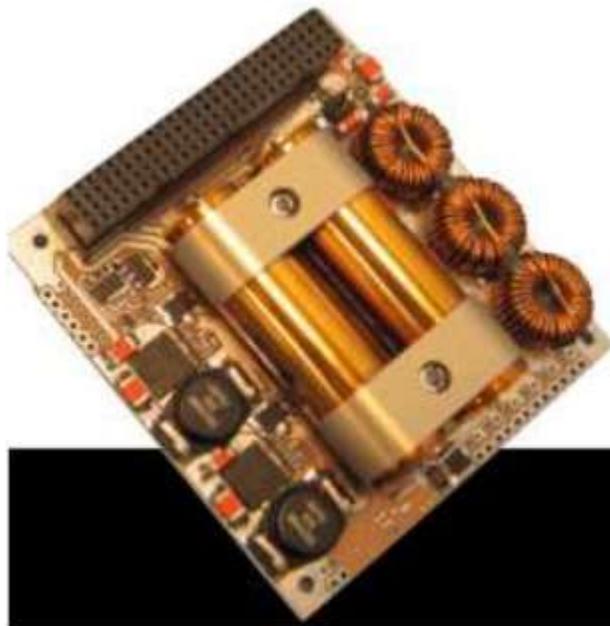


Figura 3: EPS do NANOSATC-BR2



On Board Computer (OBC)

O *OBC*, ou computador de bordo, age como o cérebro de todo o satélite. É nesse subsistema que é realizado todo o controle dos processos, como a transmissão e recepção de dados do satélite para a estação terrena de rastreamento e controle, armazenamento e operação do sistema operacional, armazenamento de todas as informações obtidas pelas cargas úteis, como dados obtidos por sensores, telemetria e o software de *Attitude Determination System (ADS)*. O *OBC* drena uma potência de 0,380 W do barramento.

Sistema de Telecomunicações

O sistema de telecomunicações caracteriza-se como o sistema responsável pelo envio e o recebimento de dados de um satélite para a estação terrena de rastreamento e controle. O NCBR2 utiliza um sistema de telecomunicações adotado em CubeSats, desenvolvido pela empresa *Innovative Solutions in Space – ISIS BV*, que utiliza as bandas de frequência de VHF e UHF para estabelecer o envio e o recebimento de dados, respectivamente.

Os nanossatélites CubeSats utilizam frequências de radioamadores compreendidas entre 130-160 MHz para a transmissão em VHF e 400-450 MHz para a recepção em UHF. Os dados enviados e recebidos pelo satélite são codificados de modo que apenas os responsáveis pela missão espacial identifiquem o conteúdo contido nas mensagens enviadas e recebidas.

O sistema de telecomunicações do NCBR2 utiliza um receptor (*TRXUV RX*) cuja potência drenada do barramento é de 0,237 W, um transmissor (*TRXUV TX*) cuja potência drenada do barramento é de 0,787 W e um Sistema de Antenas que drena uma potência de 0,040 W.

2.3. Cargas Úteis que Compõem o *Payload* do NANOSATC-BR2

Os components do *Payload* são elementos que descrevem em tempo real o comportamento de todos os subsistemas de um satélite e também desempenham o papel fundamental no posicionamento do satélite em sua órbita.

Sistema de Determinação de Atitudes Tolerantes a Falhas (SDATF)

O subsistema de SDATF foi uma carga útil adicionada ao NANOSATC-BR2 e é responsável pela determinação da posição do satélite em relação a sua órbita, de modo a informar a posição de alguns parâmetros do satélite, por exemplo, atitude do satélite em relação ao vetor solar, posição das antenas de comunicação em relação a estação terrena e posição de sensores como os magnetômetros.

Para a determinação do posicionamento de um satélite em sua órbita espacial faz-se necessário o uso dos elementos keplerianos denominados de semi-eixo maior (a), a excentricidade (e) e a anomalia média (M), que definem a elipse e localizam o satélite no plano da elipse. Para definir de forma completa a localização de um satélite em sua órbita deve-se localizar espacialmente a órbita com os chamados ângulos de Euler, que são denominados inclinação (i), ascensão reta de nodo ascendente (Ω) e o argumento do perigeu (ω). A Figura 4 representa todos os parâmetros necessários para o posicionamento de um satélite em órbita espacial em torno ao planeta Terra. (KUGA, 2008)

O sistema de determinação de attitude do NCBR2 conta com uma tripla redundância, o cálculo da potência requerida pelo sistema foi de 0,271 W.

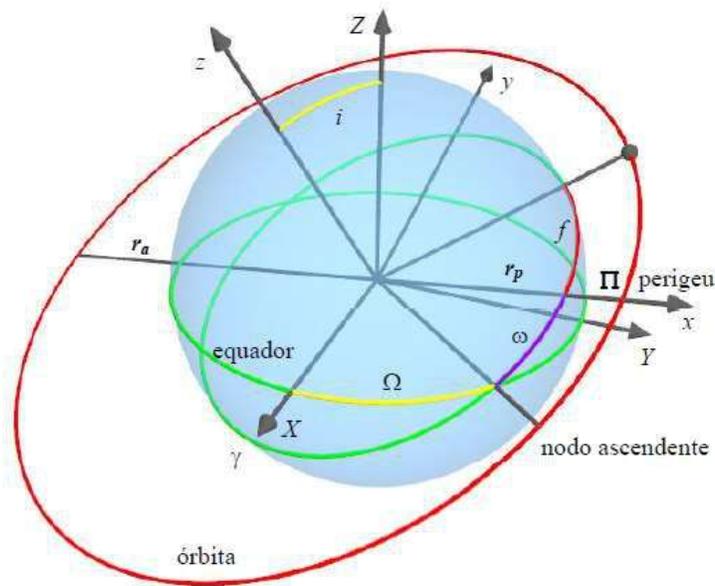


Figura 4: Representação dos pontos necessários para a o posicionamento de um satélite na órbita especial

Magnetômetro

Utiliza-se o magnetômetro largamente em satélites e aeronaves para o sensoriamento da atitude, pois promove leituras em todas as direções e a magnitude do campo magnético terrestre. Esses sensores são confiáveis, leves, demandam baixo consumo de energia e podem operar em uma larga faixa de temperatura de operação. O sensor solar caracteriza-se como um detector utilizado para proteger a instrumentação, ativação de *hardware* e como vetor de referência para o software de determinação de atitude da órbita do satélite. (WERTZ, 1978) A Figura 5 mostra o magnetômetro XEN1210, utilizado no NANOSATC-BR2 devido ao seu tamanho reduzido, baixo consumo de energia, sem histerese magnética e uma boa resolução para a medição do campo magnético terrestre.

Existem 3 magnetômetros presentes no NANOSATC-BR2, todos internos na Estrutura do CubeSat, sendo dois na unidade de carga útil e mais um na unidade de serviço. Como o magnetômetro da unidade de serviço já possui a sua demanda de potência inclusa no *EPS* o mesmo não é contabilizado no cálculo de potência consumida pelos magnetômetros, sendo assim os outros dois requerem uma potência de 0,031 W.

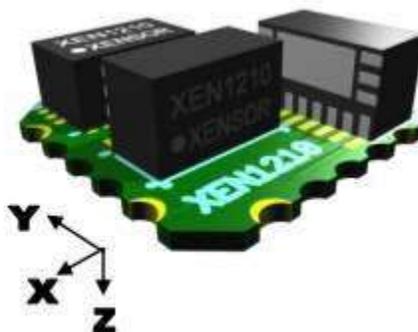


Figura 5: Representação da configuração dos magnetômetros XEN 1210 para a realização de medições nos eixos x,y,z

Sonda de Langmuir (SL)

Responsável por medir características associadas às bolhas de plasma presentes na atmosfera tais como temperatura e densidade. As bolhas de plasma são de grande importância pois derivam da interação da alta atmosfera com a atividade solar, possuindo ligação direta com os sistemas espaciais.

O consumo de potência estimado para a Sonda de Langmuir foi de 0,800 W, algumas medidas, relatadas no capítulo 5, foram tomadas com respeito a SL para assegurar um balanço de potência positivo onde a geração supre a demanda.

FPGA e Chip ANSIS

O NCBR2 contará com um FPGA e dois chips ANSIS desenvolvidos pela Santa Maria Design House – SMDH – ambos com objetivos de testar circuitos tolerantes a radiação.

A FPGA possui um consumo de potência de 0,049 W, enquanto os dois chips ANSIS consomem 0,030 W.

CAPÍTULO 3

CONDICIONAMENTO DE ENERGIA

3.1. Conversor *Buck*

Os conversores DC-DC são circuitos eletrônicos capazes de fazer a regulação de uma fonte de tensão desregulada para um nível de tensão ajustado e regulado requerido pelo projetista. Realiza-se a regulagem da tensão de saída segundo a variação do tempo de chaveamento, ou a razão cíclica do elemento semiconductor responsável pelo chaveamento do circuito.

Os conversores DC-DC, ou choppers são circuitos eletrônicos responsáveis pela conversão de um nível de tensão fixo em uma fonte de tensão variável. Pode-se fazer a analogia de que os circuitos chopper são considerados o equivalente a um transformador em corrente alternada com uma relação de espiras variável. (Rashid, 1999)

O conversor Buck (ou abaixador de tensão) é um dos conversores de potência mais simples e mais utilizados na indústria, podendo ser implementado com apenas uma chave controlada, um diodo, um indutor e um capacitor que serve como filtro de saída.

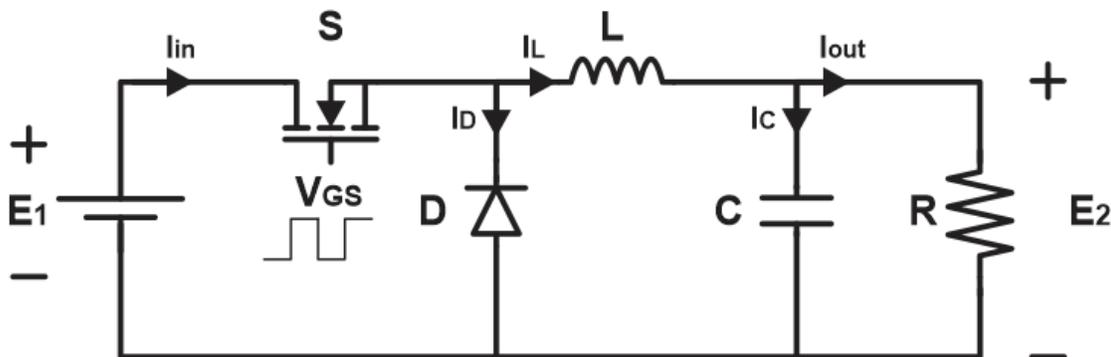


Figura 6: Diagrama de circuito do conversor abaixador de tensão.

Quando opera em CCM, modo de condução contínua, o conversor possui duas etapas de operação. Essas etapas são definidas conforme o estado das chaves, estando abertas ou fechadas. As chaves comutam dentro de um período T , associado a uma frequência f_s . Considera-se que a chave S fica conduzindo durante um período $D \cdot T$, onde D é a razão cíclica, e que o diodo conduz durante o restante do período.

A partir da análise dessas etapas de operação, podemos definir as tensões e correntes no conversor, necessárias para a escolha dos componentes. A análise é feita em regime e, portanto, assumimos que já estão estabelecidas as tensões de entrada V_{in} e de saída V_{out} , além de existir um valor inicial de corrente no indutor.

Primeiro Estágio – Chave S Conduzindo ($0 \leq t \leq D \cdot T$)

Considerando a chave interruptora conduzindo para $0 \leq t \leq DT_s$, ou seja, a tensão V_{GS} alta, o indutor é carregado nesse período. O diodo é polarizado reversamente, se comportando como um circuito aberto impedindo a passagem de corrente para a carga E_2 . Para garantir a operação em CCM, considera-se uma corrente inicial diferente de 0, I_m . A Figura 7 ilustra o circuito durante a primeira etapa de operação do conversor.

Equacionando o circuito para essa etapa, tem-se a tensão de entrada igual a soma da tensão no indutor com a tensão de saída.

$$E_1 = v_L + E_2 = L \cdot \frac{di_L}{dt} + E_2 \quad (1)$$

Considerando a corrente inicial I_m , tem-se.

$$\int_0^{D \cdot T_s} \frac{E_1 - E_2}{L} dt = \int_{I_m}^{i_L} di_L \quad (2)$$

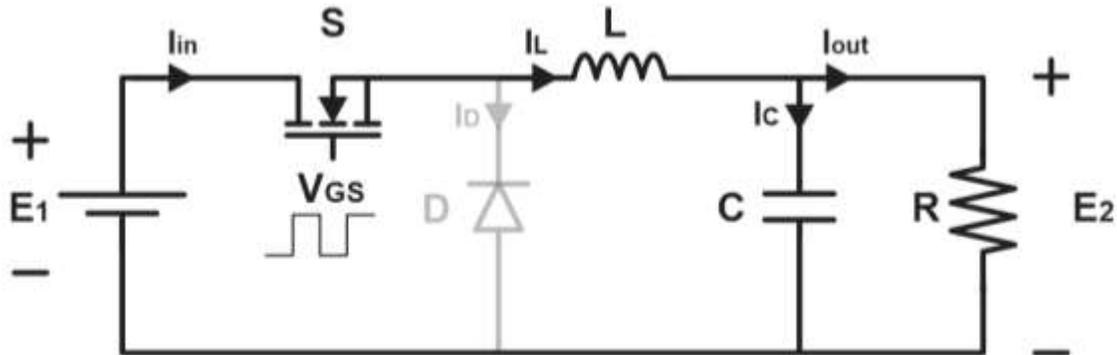


Figura 7: Circuito equivalente da primeira etapa de operação.

$$i_L(t) = I_m + \frac{E_1 - E_2}{L} \cdot t \quad (3)$$

A equação (3) é válida para o tempo correspondente à primeira etapa de operação, ou seja, para $0 \leq t \leq DT_s$. Em $t = DT_s$ ocorre o ponto de corrente máxima no indutor, I_M , definida por (4).

$$I_M = I_m + \frac{E_1 - E_2}{L} \cdot D \cdot T_s \quad (4)$$

Segundo Estágio – Diodo Conduzindo ($D \cdot T \leq t \leq T$)

Na segunda etapa de operação do conversor, $V_{gs} = 0V$, ou seja, o interruptor é um circuito aberto. Sem o caminho de corrente anterior, a energia armazenada no indutor força a polarização do diodo, o que proporciona caminho para a corrente que está armazenada em forma de campo magnético no indutor alimentar a saída. A Figura 8 ilustra o circuito para essa etapa de operação.

A tensão no indutor é então dada por (5):

$$v_L = -E_2 = L \cdot \frac{di_L}{dt} \quad (5)$$

Dado o valor máximo de corrente no indutor I_M , (4), a corrente no indutor para os instantes de tempo $DT_s < t < t_1$ é dada por:

$$\int_{DT_s}^{t_1} \frac{-E_2}{L} dt = \int_{I_M}^{i_L} di_L \quad (6)$$

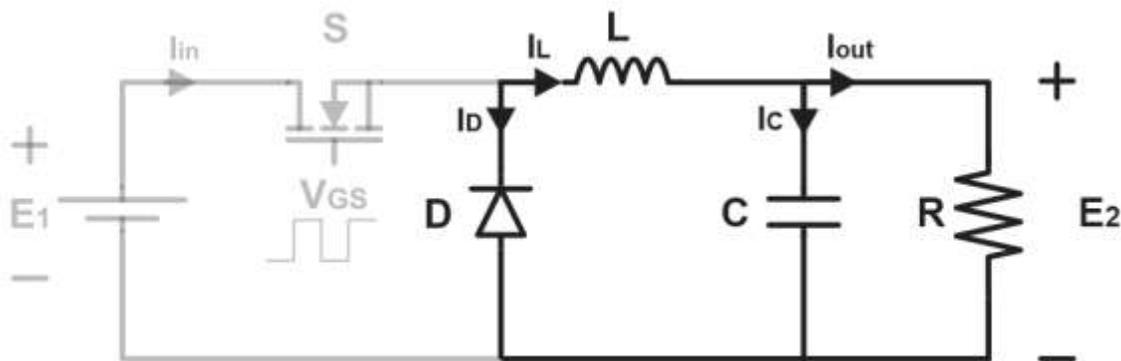


Figura 8 Circuito equivalente da segunda etapa de operação.

Relatório Final de Atividades

$$i_L(t) = I_M + \frac{E_2}{L} \cdot (t_1 - DT_s) \quad (7)$$

O princípio de operação é o modo CCM, o que implica que no tempo T_s , I_L deve ser igual a I_m , aplicando a equação (4) em (7), tem-se

$$I_M - \frac{E_1 - E_2}{L} \cdot D \cdot T_s = I_M - \frac{E_2}{L} \cdot (T_s - DT_s) \quad (8)$$

$$-E_1 \cdot D + E_2 \cdot D = -E_2 \cdot (1 - D) \quad (9)$$

$$-E_1 \cdot D = -E_2 \quad (10)$$

$$\frac{E_2}{E_1} = D \quad (11)$$

Sendo (11) a definição para o conversor buck operar em CCM em função das tensões de entrada e saída.

Indutância Crítica

O valor da indutância é equacionado como segue [Rashid]:

$$L = \frac{E_2 \cdot (1 - D)}{f_s \cdot \Delta I_{out}} \quad (12)$$

Para garantir a operação em CCM, onde a corrente no indutor, em toda faixa de tempo, deve ser diferente de zero [Rashid], determina-se a que a indutância do indutor utilizado no conversor (12) deve ser maior que a indutância crítica dada por (13).

$$L \geq L_{crit} = \frac{E_1^2 \cdot D}{2 \cdot P_{out} \cdot f_s} \quad (13)$$

Os valores da corrente média, corrente máxima e mínima, do modo CCM, são definidos por (14), (15) e (16), respectivamente:

$$I_{out} = \frac{P_{out}}{E_2} \quad (14)$$

Relatório Final de Atividades

$$I_M = I_{out} + \frac{\Delta I_{out}}{2} \quad (15)$$

$$I_m = I_{out} - \frac{\Delta I_{out}}{2} \quad (16)$$

Onde as variações da corrente de saída são provenientes da amplitude máxima de ripple da corrente no indutor, podendo ser especificada em projeto.

O filtro de saída do conversor é projetado através de um circuito RC, para isso projeta-se a resistência de saída do conversor, considerando a tensão e a potência de saída (17).

$$R_{out} = \frac{E_2^2}{P_{out}} \quad (17)$$

Para findar a composição do filtro RC, deve-se projetar o capacitor, o qual alimentará a resistência de saída no período $DT_s < t < T_s$ a fim de manter a tensão constante, já que na primeira etapa de operação, o diodo não conduz e a resistência de saída não é alimentada pelo conversor. O valor da capacitância é determinada por (18), sendo ΔV_{out} a variação de tensão de saída, especificada em projeto.

$$C = \frac{(1 - D) \cdot V_{out}}{8 \cdot L \cdot \Delta V_c \cdot f_s^2} \quad (18)$$

Formas de Onda do Conversor Buck

Conhecendo o funcionamento do conversor, podemos então prever as formas de onda da tensão e corrente nos principais componentes. A partir da análise dessas formas de onda, é possível definir os principais estresses nos semicondutores.

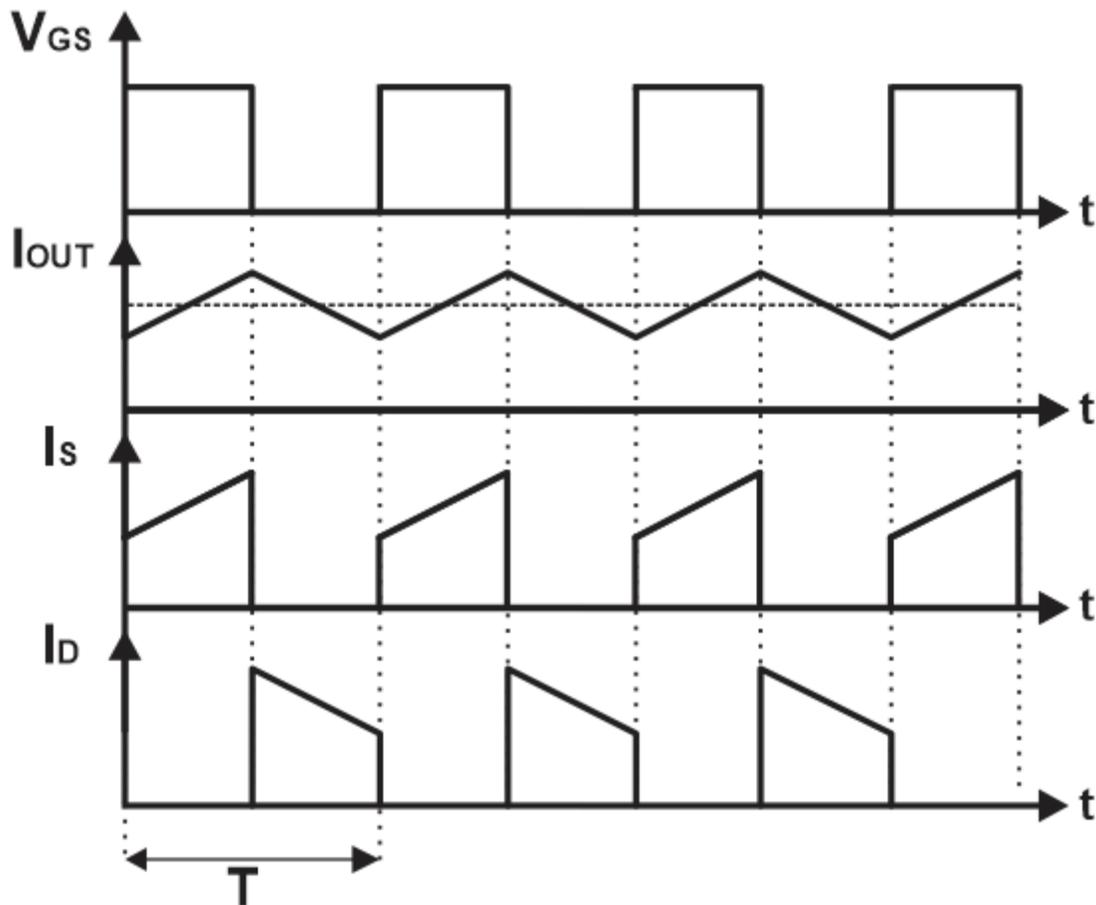


Figura 9: Sequência de formas de ondas nos principais componentes.

3.1.1. Dimensionamento do Conversor Buck

O conversor buck apresenta a função de rebaixar o nível de tensão das baterias para dois níveis de tensão iguais a 5 e 3,3 Volts, largamente utilizados para a alimentação de componentes eletrônicos e padrão para a classe de nanossatélites CubeSat.

Visualiza-se na Tabela 1 e Tabela 2, as qualificações técnicas do conversor buck1 e buck2 que proporcionam a tensão de saída igual a 5 e 3,3 Volts, respectivamente. Salienta-se que o nível da tensão das baterias apresenta variações e o arranjo de duas baterias de Li-ion em série a tensão está compreendida entre 5,4 e 8,4 Volts.

Tabela 1: Características do conversor Buck1.

Parâmetro	Simbologia	Valor
Tensão de entrada	V_{in}	5,4 – 8,4V
Tensão de saída	V_{out}	5V
Frequência de amostragem	$f_{chaveamento}$	200kHz
Potência de saída	P_{out}	5W

Tabela 2: Características do conversor Buck2.

Parâmetro	Simbologia	Valor
Tensão de entrada	V_{in}	5,4 – 8,4V
Tensão de saída	V_{out}	3.3V
Frequência de amostragem	$f_{chaveamento}$	200kHz
Potência de saída	P_{out}	5W

3.4.1.1 Conversor Buck com tensão de saída de 5 Volts

A partir da definição da tensão de saída do conversor buck1 e do critério da máxima ondulação de corrente fez-se a definição da indutância necessária para que o conversor atuasse no modo CCM.

Com a potência do conversor definida em 5 Watts, fez-se o cálculo da corrente e a máxima ondulação de corrente circulante pelo circuito, expressos em (19) e (20), respectivamente.

$$I = \frac{P}{V} = 1A \quad (19)$$

$$\Delta I = 0.2I = 0.2A \quad (20)$$

Utilizando a expressão que rege a tensão no indutor e a equação (21) que determina a razão cíclica do conversor chega-se em (22) ao resultado da indutância necessária para atender os requisitos de projeto.

$$d_{buck} = \frac{5}{8.4} = 0.595 \quad (21)$$

$$L = 50.62\mu\text{H} \quad (22)$$

Portanto definiu-se com o auxílio de simulações no software Psim 9.0 que a indutância deve ser igual a $L = 51\mu\text{H}$. Na Figura 10 demonstra-se o sinal de tensão de saída e a corrente do indutor com o conversor operando em malha aberta e a carga com resistência igual a $R = 15\Omega$ e a potência igual a 1,667 Watts, demonstrando um consumo característico de um nanossatélite CubeSat. Salienta-se que na simulação usou-se as não linearidades presentes nos componentes, como a queda de tensão do diodo e a resistência de condução do mosfet.

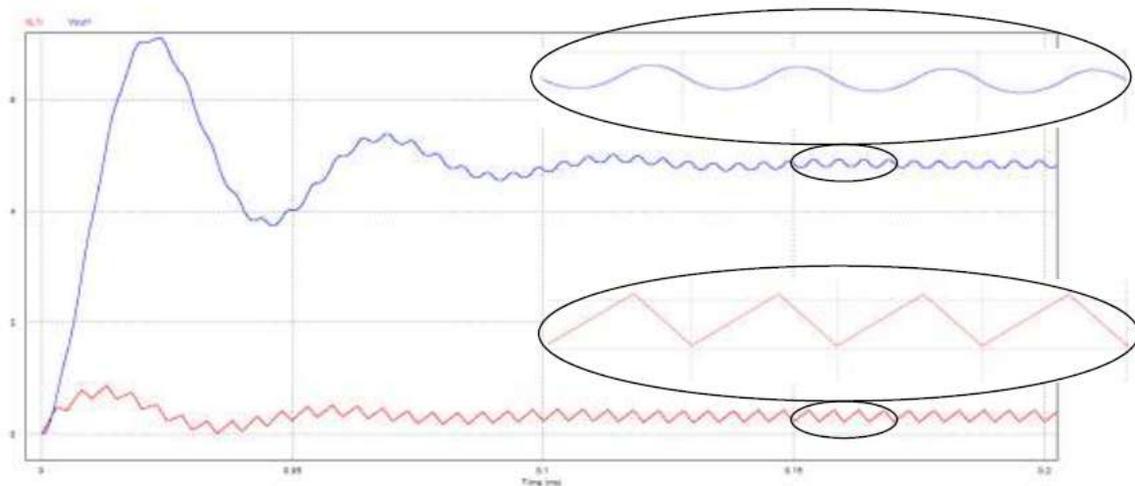


Figura 10: Tensão de saída do conversor e a corrente do indutor comprovando o modo de condução CCM

Considerando o rendimento de 90% determinou-se a corrente eficaz do conversor e a corrente de pico em (23) e (24).

$$I_{eficaz} = \frac{1}{0.9} = 1.11\text{A} \quad (23)$$

$$I_{pico} = 1.11 + \frac{0.2I_{eficaz}}{2} = 1.22A \quad (24)$$

Para a escolha do modelo do núcleo executou-se o cálculo da energia presente no indutor, dada por (25).

$$E = 51 \cdot 10^{-6} \cdot 1000 \cdot 1.22^2 = 0.076mHA^2 \quad (25)$$

O modelo ideal para a aplicação ver Figura 11, modelo 77130, não foi utilizado por motivos de disponibilidade nos laboratórios, portanto, optou-se pelo modelo 77050 da empresa Magnetics Incorporation.

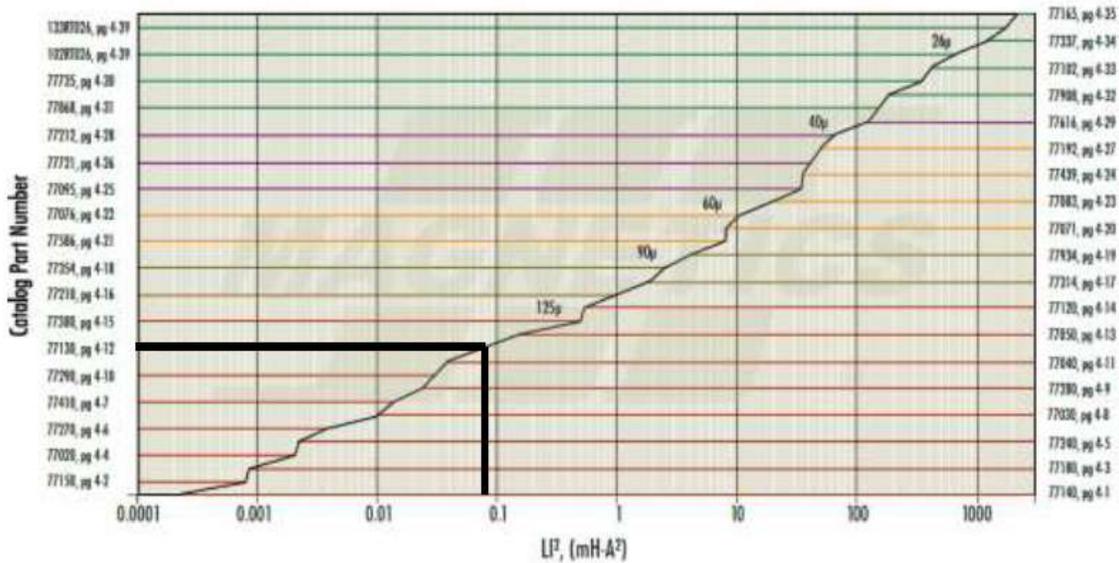


Figura 11: Escolha do núcleo ideal para o indutor de tecnologia Kool Mμ®.

O indutor apresenta indutância de 51.52nH/T². A partir desta constatação determinou-se o número de espiras inicial para o projeto em (26).

$$N_{buck1} = \sqrt{\frac{51 \cdot 10^{-6} \cdot 10^9}{51.52}} = 31.64 \quad (26)$$

Relatório Final de Atividades

Logo definiu-se espiras. Posteriormente fez-se a escolha do condutor ideal para a aplicação tendo em vista o efeito skin, previamente descrito no trabalho. O condutor escolhido foi o condutor de cobre AWG 28 devido a sua compatibilidade com o diâmetro do efeito skin e a disponibilidade nos laboratórios.

O condutor AWG 28 apresenta a capacidade de condução de 0,402 A com a densidade de corrente de corrente de 500A/cm², portanto é necessário o uso de mais de um condutor para transportar a corrente eficaz do conversor, igual a $I_{eficaz} = 1.11A$. Desta forma em (27) apresenta-se no número de condutores em paralelo para o presente indutor.

$$N_{paralelo} = \frac{1.11}{0.402} = 2.764 \quad (27)$$

Assim optou-se pelo uso de três condutores em paralelo de modo a proteger a isolação dos condutores de cobre. Calculou-se o percentual de ocupação da janela do indutor fazendo o somatório das áreas de todos os condutores envolvidos ao núcleo toroidal, portanto em (28) tem-se a área dos condutores e (29) o percentual da área da janela.

$$A_{cobre} = 10.08mm^2 \quad (28)$$

$$\%_{wind} = \frac{10.08}{38.3} = 26.31\% \quad (29)$$

Um resumo de todo o projeto do indutor de núcleo toroidal de tecnologia Koll Mμ para o conversor buck1 com a tensão de saída igual a 5 Volts é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3: Tabela resumo do projeto do indutor para o conversor buck1

Parâmetro	Simbologia	Valor
Indutância	<i>L</i>	51μH
Energia	<i>E</i>	0.076mHA ²
Modelo do núcleo	—	77050

Número de espiras no indutor	N_{buck1}	32
Número de condutores em paralelo	$N_{paralelo}$	3
Área total de cobre	A_{cobre}	$10.08mm^2$
Percentual de janela do núcleo	$\%_{window}$	26.31%

3.4.1.2 Conversor Buck com tensão de saída de 3,3 Volts

A partir da potência do conversor definida em 5 Watts fez-se o cálculo da corrente e a máxima ondulação de corrente, resultando em uma corrente eficaz igual a e a variação de corrente.

Utilizando a expressão que rege a tensão no indutor e a equação (30) que determina a razão cíclica do conversor chega-se em (43) ao resultado da indutância necessária para atender os requisitos de projeto.

$$d_{buck} = \frac{3.3}{8.4} = 0.393 \quad (30)$$

$$L = 33.385\mu H \quad (31)$$

Portanto definiu-se com o auxílio de simulações no software Psim 9.0 que a indutância deve ser igual a $L = 22\mu H$. Na Figura 12 é demonstrado o sinal de tensão de saída e a corrente do indutor com o conversor operando em malha aberta e a carga com resistência igual a $R = 15\Omega$ e a potência igual a 0,726 Watts.

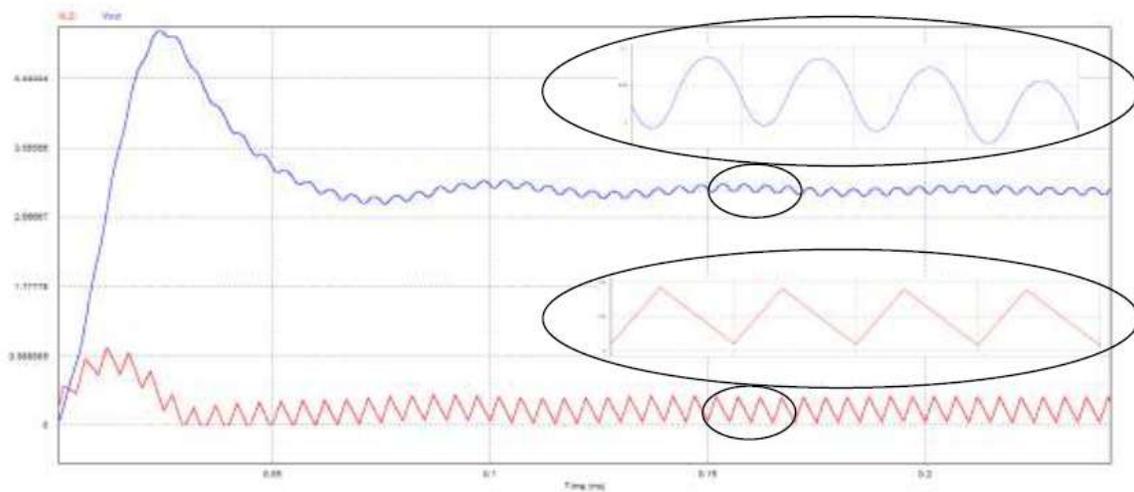


Figura 12: Simulação da tensão de saída (azul) e a corrente do indutor (vermelho) no conversor buck2.

Considerando o rendimento de 90% determinou-se a corrente eficaz do conversor e a corrente de pico em (32) e (33).

$$I_{eficaz} = \frac{5}{\frac{3.3}{0.9}} = 1.915A \quad (32)$$

$$I_{pico} = 1.915 + 0.2 \cdot \frac{I_{eficaz}}{2} = 2.107A \quad (33)$$

Para a escolha do modelo do núcleo executou-se o cálculo da energia presente no indutor, dada por (34).

$$E = 0.146 \text{ mHA}^2 \quad (34)$$

Analisando a Figura 13 verifica-se que o núcleo ideal para o conversor buck em estudo é o modelo 77050.

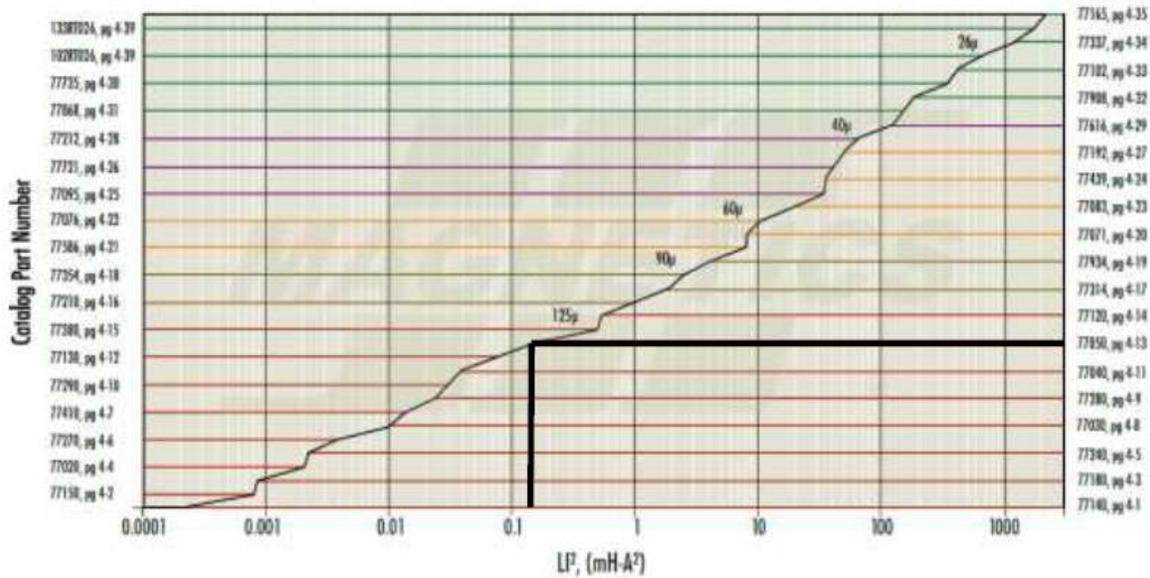


Figura 13: Escolha do núcleo ideal para o indutor do conversor buck2.

O número de espiras inicial conforme equação (35) utilizou o mesmo fator de indutância utilizado nos indutores anteriores.

$$N_{buck2} = \sqrt{\frac{33 \cdot 10^{-6} \cdot 10^9}{51.52}} = 25.3 \quad (35)$$

Portanto definiu-se espiras. O condutor utilizado para a confecção do indutor do conversor buck2 é o condutor AWG 28, devido aos critérios do efeito skin relatado nos indutores anteriores. O número de condutores em paralelo necessários para a condução da corrente eficaz de 1,915 Amperes é descrito em (36).

$$N_{paralelo} = \frac{1.915}{0.402} = 4.76 \quad (36)$$

Para que a isolamento do condutor de cobre não fosse comprometida com a passagem de uma superior a 0,402 Amperes fez-se o uso de 5 condutores em paralelo. Determinou-se em (37) a área ocupada por todos os condutores e em (38) o percentual da janela do núcleo.

$$A_{cobre} = 13.65mm^2 \quad (37)$$

$$\%_{wind} = \frac{13.65}{38.3} = 35.6\% \quad (38)$$

O quadro resumo do projeto desenvolvido para o indutor do conversor buck2, que apresenta a tensão de saída de 3,3 Volts é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4: Resumo do projeto do indutor de núcleo toroidal do conversor buck2.

Parâmetro	Simbologia	Valor
Indutância	L	$33\mu H$
Energia	E	$0.146mHA^2$
Modelo do núcleo	–	77050
Número de espiras no indutor	N_{buck1}	26
Número de condutores em paralelo	$N_{paralelo}$	5
Área total de cobre	A_{cobre}	$13.65mm^2$
Percentual de janela do núcleo	$\%_{window}$	35.6%

3.2. Conversor *Boost*

O conversor elevador de tensão, mais conhecido com conversor Boost, é largamente utilizado em aplicações que demandem tensões maiores na saída do sistema. É um conversor simples, robusto e de baixo custo. O conversor Boost é muito utilizado em aplicações para correção do fator de potência por possuir diversas vantagens quando comparado à outras topologias, como a presença de um indutor na entrada do conversor (absorvendo grandes variações de tensão na entrada) e localização da chave ativa referenciada à terra. Além disso, possui certa simplicidade e alta eficiência se comparado às outras topologias convencionais.

O modo de condução contínua foi determinado para realizar a análise de perdas no circuito, visto que a operação em CCM provê maiores derivadas de corrente nos semicondutores do circuito, o que aumenta consideravelmente as perdas por comutação do conversor. A análise de perdas no circuito será discutida posteriormente. A Figura 14 mostra o conversor Boost estudado. Considera-se operação no modo de condução contínua, ou seja, a corrente no indutor não chega a 0 no fim do período de chaveamento.

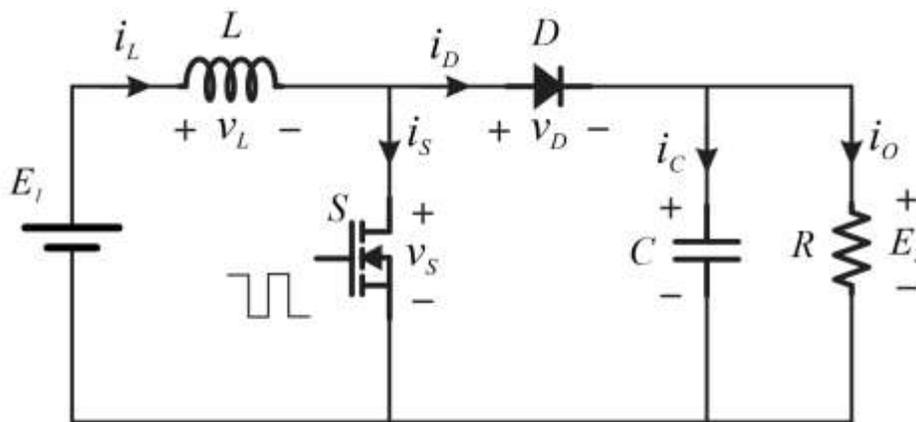


Figura 14: Conversor Boost estudado

1ª Etapa de Operação

Na primeira etapa de operação, consideramos a tensão V_{gS} alta no interruptor. Dessa forma, o interruptor conduz para $0 \leq t \leq DT_s$, carregando o indutor nesse período. O diodo é polarizado reversamente, bloqueando a passagem de corrente para a carga E_2 . Para garantir a operação em CCM, considera-se uma corrente inicial diferente de 0, chamada de I_m . A Figura 15 mostra a primeira etapa de operação do conversor.

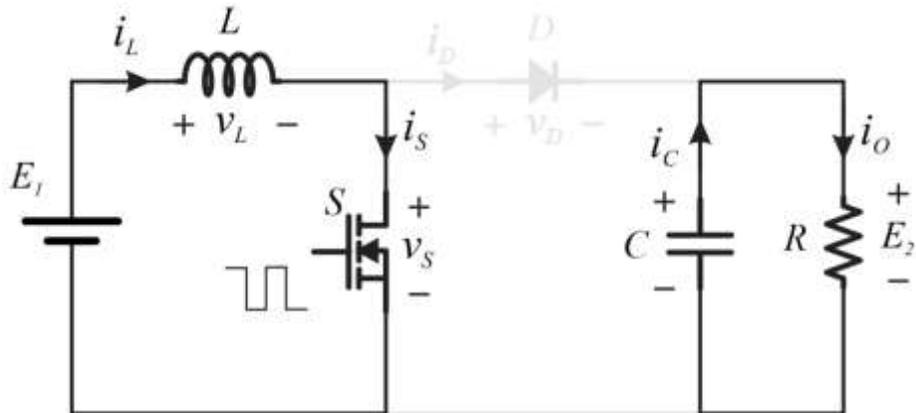


Figura 15: Primeira etapa de operação – Carregamento do indutor L .

Neste momento, a tensão de entrada é igual a tensão no indutor.

$$E_1 = v_L = L \cdot \frac{di_L}{dt} \quad (39)$$

Considerando a corrente inicial I_m , obtemos

$$\int_0^{D \cdot T_s} \frac{E_1}{L} dt = \int_{I_m}^{i_L} di_L \quad (40)$$

$$i_L = I_m + \frac{E_1}{L} \cdot t \quad (41)$$

A expressão (3) é válida para $0 \leq t \leq DT_s$, tempo correspondente à primeira etapa de operação. Em $t = DT_s$ temos o ponto de corrente máxima no indutor, denominada I_M , definida então por

$$I_M = I_m + \frac{E_1}{L} \cdot D \cdot T_s \quad (42)$$

Segunda Etapa de Operação

Na segunda etapa de operação do conversor, têm-se que a tensão V_{gs} do interruptor é 0, ou seja, o interruptor é um circuito aberto. Sem o caminho de corrente anterior, a corrente é forçada a passar pelo diodo, dessa vez diretamente polarizado, alimentando a carga e o capacitor de saída. A Figura 16 mostra essa etapa de operação.

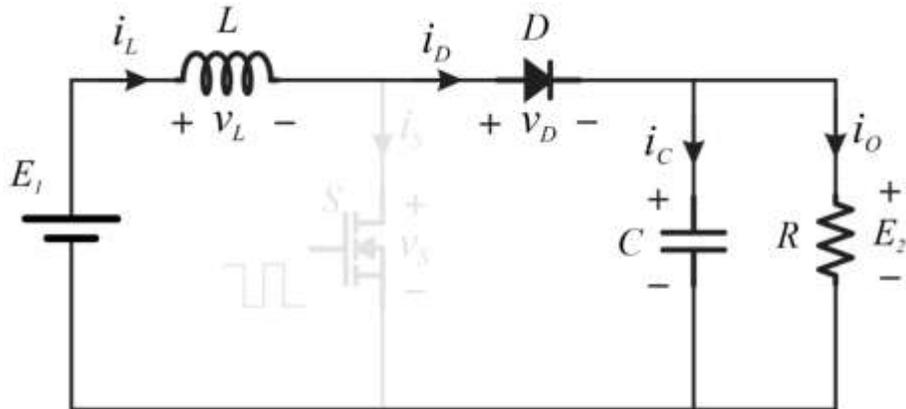


Figura 16: Segunda etapa de operação – Alimentação da carga pela corrente do indutor.

Nesse momento, o indutor descarrega na saída. A tensão no indutor v_L é, na segunda etapa de operação, dada por:

$$v_L = E_1 - E_2 = L \cdot \frac{di_L}{dt} \quad (43)$$

Dado o valor máximo de corrente no indutor I_M , obtemos a corrente no indutor para os instantes de tempo $DT_s < t < t_1$.

$$\int_{DT_s}^{t_1} \frac{E_1 - E_2}{L} dt = \int_{I_M}^{i_L} di_L \quad (44)$$

$$i_L = I_M + \frac{E_1 - E_2}{L} \cdot (t_1 - DT_s) \quad (45)$$

Como a corrente no indutor no tempo T_s deve ser igual a I_m , sendo este tempo t_1 , temos:

$$I_M + \frac{E_1 - E_2}{L} \cdot (T_s - DT_s) = I_m \quad (46)$$

Igualando (4) e (8), obtemos:

$$I_m + \frac{E_1}{L} \cdot D \cdot T_s + \frac{E_1 - E_2}{L} \cdot (T_s - DT_s) = I_m \quad (47)$$

$$E_1 \cdot D + (E_1 - E_2) \cdot (1 - D) = 0 \quad (48)$$

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{1}{1-D} \quad (49)$$

Essa expressão define a razão cíclica para o conversor operar em CCM, considerando as tensões de entrada e saída. Para o modo de condução descontínuo DCM, deve-se garantir que o sistema obedeça a seguinte inequação:

$$D \leq \frac{E_2 - E_1}{E_2} \quad (50)$$

Indutância Crítica

O cálculo da indutância crítica tem como objetivo garantir a operação em CCM, sabendo que a corrente no indutor deve ser sempre maior que zero.

$$L \geq L_{crit} = \frac{E_1^2 \cdot D}{2 \cdot P_{out} \cdot f_s} \quad (51)$$

Os valores máximos e mínimos de corrente são definidos por:

$$I_M = I_{in} + \frac{\Delta I}{2} = \frac{I_{out}}{1-D} + \frac{D \cdot E_1}{2 \cdot L \cdot f_s} \quad (52)$$

$$I_m = I_{in} - \frac{\Delta I}{2} = \frac{I_{out}}{1-D} - \frac{D \cdot E_1}{2 \cdot L \cdot f_s} \quad (53)$$

Além da definição dos níveis de corrente no indutor, projeta-se a resistência de saída do conversor, considerando a tensão de saída e a potência de saída. A expressão que define a resistência de saída no conversor Boost é

$$R_{out} = \frac{E_2^2}{P_{out}} \quad (54)$$

A resistência é alimentada pela entrada no período $DT_s < t < T_s$. Porém, na primeira etapa de operação, o diodo não conduz e a resistência de saída não é alimentada pelo conversor. Como alternativa, um capacitor é colocado em paralelo com a resistência de saída, de forma a alimentar a carga quando esta não for alimentada. O valor da capacitância é determinada por (55), sendo ΔV_C a variação de tensão desejada na saída.



Relatório Final de Atividades

$$C = \frac{I_{out} \cdot D}{\Delta V_c \cdot f_s} \quad 55)$$

CAPÍTULO 4

FONTE DE ENERGIA ELÉTRICA EM AMBIENTE ESPACIAL

A única fonte de energia externa no ambiente espacial é a radiação solar, portanto qualquer sistema que não utiliza energia solar deve carregar sua própria fonte de energia, como bateria primária, célula combustível, energia nuclear ou célula química. (PATEL, 2005)

4.1. Energia fotovoltaica

A maior parte dos satélites e aplicações espaciais utiliza como a principal fonte de geração de energia elétrica a conversão de energia fotovoltaica. Os altos custos para a utilização de reatores nucleares, células combustível e a conversão termoelétrica fazem com que essa seja a opção mais utilizada atualmente. (PATEL, 2005)

Define-se a densidade de potência da energia solar, conhecida como a constante solar, sendo igual a 1366 W/m^2 acima da atmosfera terrestre. Essa potência sofre a redução de aproximadamente 30% no momento que os raios solares passam pela atmosfera terrestre, proporcionando a insolação na superfície terrestre de 1000 W/m^2 . O espectro de frequências do sol é similar a de um corpo negro a temperatura de 6000 K, onde a curva característica apresenta o comprimento de onda de 0,2 e $2 \mu\text{m}$, Figura 17, onde o pico de energia está concentrado em $0,5 \mu\text{m}$. (Lynn, 2010)

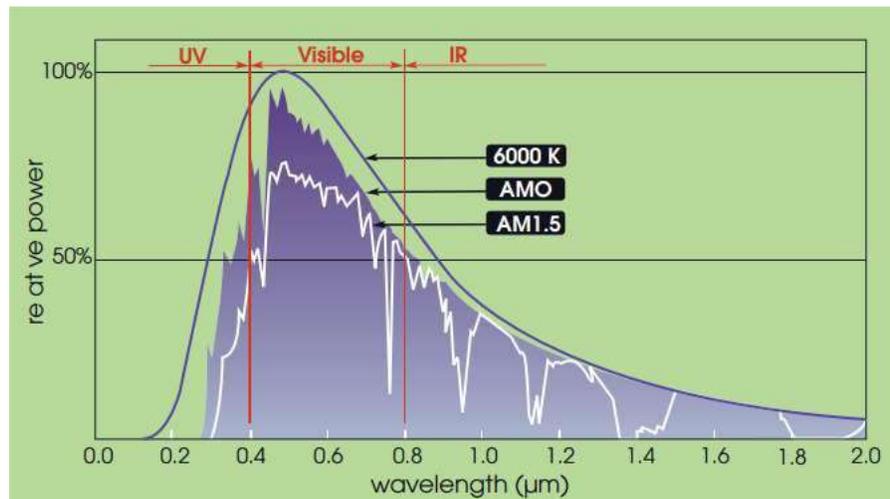


Figura 17: Espectro de Frequência da radiação solar

4.2. Célula Fotovoltaica

Define-se a célula fotovoltaica como um dispositivo semicondutor constituído normalmente de silício, formado por uma junção p-n com a dopagem de elementos químicos com elétrons e lacunas, que quando exposto a luz libera elétrons em torno de um circuito fechado (MOÇAMBIQUE, 2012). As cargas são geradas quando a energia do fóton incidente é suficiente para desprender alguns dos elétrons da camada de valência do material semicondutor e do comprimento de onda da luz incidente, portanto a taxa de elétrons depende do fluxo de luz incidente e da capacidade de absorção do semicondutor (MOÇAMBIQUE, 2012).

O modelo de uma célula fotovoltaica e o seu circuito equivalente, incluindo a sua resistência série e paralela, são apresentados na Figura 18.

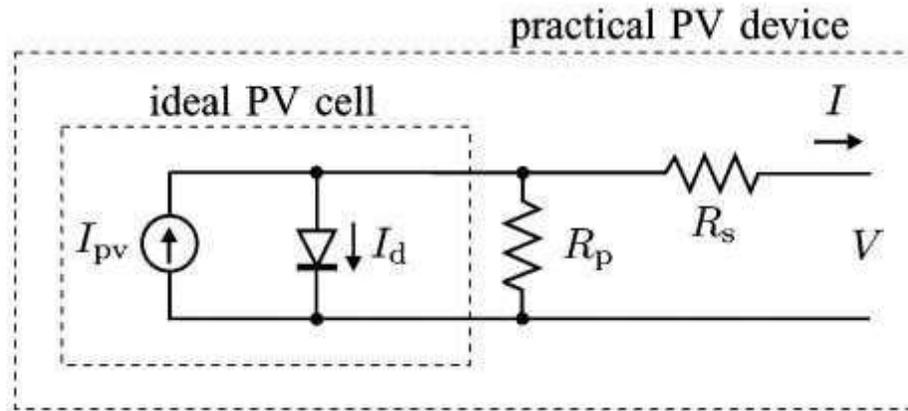


Figura 18: Representação do circuito equivalente da célula fotovoltaica

4.3. Geração de Energia por Software

Através de um código em Matlab, desenvolvido por um colega do grupo de pesquisa, foi simulado a geração de energia elétrica em ambiente espacial considerando a incidência solar, albedo e velocidade angular de rotação do satélite. A geração em cada uma das faces do satélite é apresentada na Figura 19

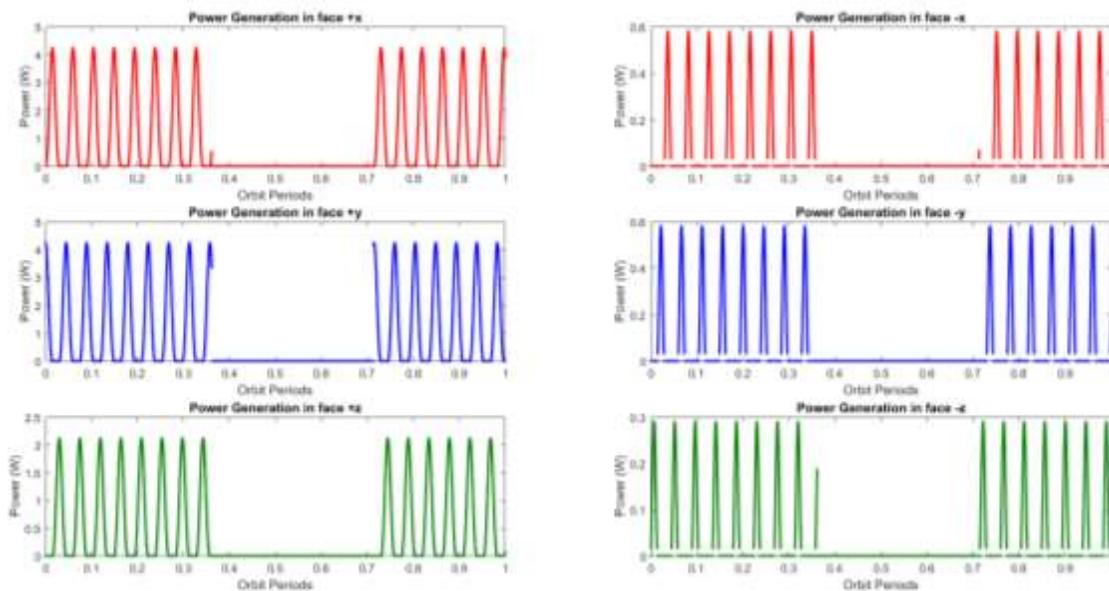


Figura 19: Geração de potência em cada face.

No entanto, o valor de interesse é o da geração de todas as células solares combinadas. Isto é apresentado na Figura 20, onde o aumento notável da geração ocorre enquanto o satélite encontra-se no período de eclipse.

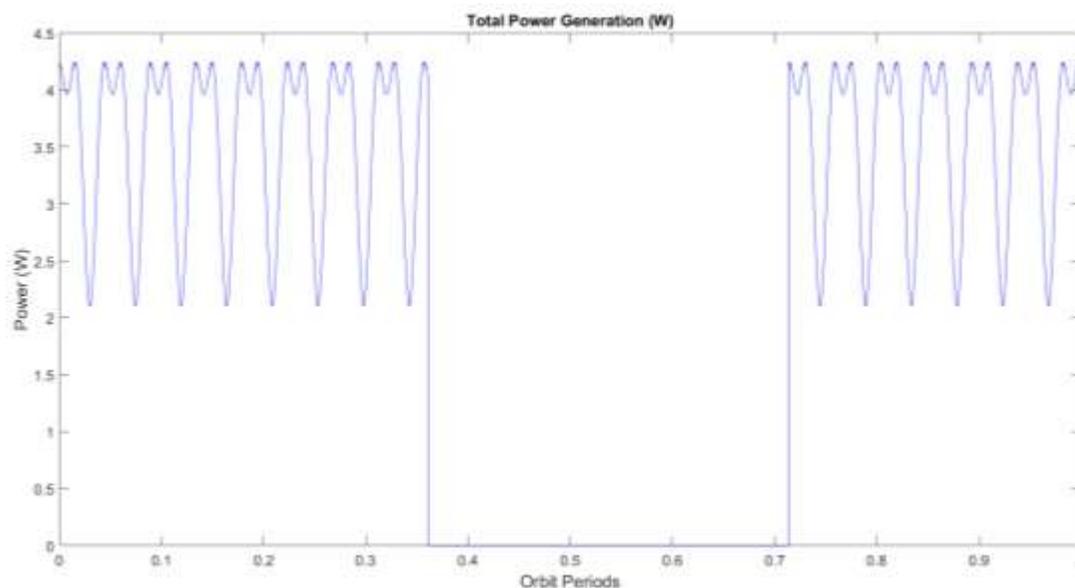


Figura 20: Geração de potência total em função do tempo.

Considerando diferentes velocidades angulares de rotação do satélite, a geração de potencia estimada resulta em alguns valores mostrados na Tabela 5.

Tabela 5: Geração de potência por simulação.

Velocidade Angular X axis (rad/s)	Velocidade Angular Y axis (rad/s)	Velocidade Angular Z axis (rad/s)	Potência Média Gerada (W)
0	0	0	2.750
0.087	0.087	0.087	2.296
0.1221	0.035	0.070	2.233
0.2618	0.2618	0.2618	2.294
1.047	1.047	1.047	2.294
1.57	1.57	1.57	2.294

Estes valores representam o valor médio de todo o período orbital, considerando a energia total gerada pelas seis faces. O primeiro caso está na linha 1, onde a velocidade



Relatório Final de Atividades

angular é zero, e tem uma face voltada para o sol com ângulo de incidência quase zero. Esta é uma das melhores configurações para geração de energia, no entanto, é altamente improvável que isso aconteça.

Portanto o resultado que melhor representa a geração de potência, seria a média dos valores obtidos com velocidade angular diferente de zero, visto que o satélite não apresenta controle de atitude. Sendo assim, a potência média gerada fica em torno de 2,29 W.

CAPÍTULO 5

BALANÇO DE POTENCIA

Essencial para assegurar o sucesso da missão no quesito energético, essa medida relaciona os estudos e os resultados obtidos sobre a geração de energia elétrica em ambiente espacial e os valores de potência requerido por cada subsistema do NANOSATC-BR2.

A Tabela 6 relaciona os componentes elétricos e eletrônicos do NCBR2 com as respectivas potências consumidas.

Tabela 6: Balanço de Potência sem os ajustes sugeridos.

Componentes	Potência Máxima	Ciclo de trabalho (em porcentagem)	Consumo com o ciclo de trabalho
Sistema Elétrico de Potência	0,249 W	100 %	0,249 W
Computador de Bordo	0,380 W	100 %	0,380 W
Receptor (TRXUV RX)	0,237 W	100 %	0,237 W
Transmissor (TRXUV TX)	0,787 W	4,2 %	0,033 W
Sistema de Antena	0,040 W	100 %	0,040 W
2 Magnetômetros (XEN 1210)	0,031 W	100 %	0,031 W
FPGA	0,049 W	100 %	0,049 W
2 Chips SMDH	0,030 W	100 %	0,030 W
Sonda de Langmuir	0,800 W	100 %	0,800 W
Determinação de Atitude SDATF	0,271 W	100 %	0,271 W
TOTAL			2,12 W

O ciclo de trabalho, tempo em que o sistema ou componente permanecerá ativo dentro do período orbital, foi contabilizado e o resultado de consumo total foi de 2,12W. Alguns artigos científicos, o estudo realizado no Capítulo 4 e as tabelas fornecidas pela ISIS nos fazem assumir que a geração média de um CubeSat 2U é de aproximadamente 2Wh. Tendo como ponto de partida os resultados teóricos, é apresentado o balanço de potencia da Tabela 7, onde nota-se um grande consumo demandado pela Sonda de

Langmuir, portanto recomendamos a diminuição do seu ciclo de trabalho, limitando-a ao período de insolação da orbita, que é de aproximadamente 67% da orbita, ou 65 minutos dos 96 minutos de período orbital. Tal ação diminuiria a profundidade de descarga das baterias de Li-ion aumentando a sua vida útil. O balanço de potência com as correções iniciais está apresentado na Tabela 8.

Tabela 7: Balanço de Potência com as correções iniciais.

Components	Maximum Consumption	Duty Cycle	Consumption with duty cycle
Electric Power Subsystem	0,249 W	100 %	0,249 W
Board Computer	0,380 W	100 %	0,380 W
Receiver (TRXUV RX)	0,237 W	100 %	0,237 W
Transmitter (TRXUV TX)	0,787 W	4,2 %	0,033 W
Antenna system	0,040 W	100 %	0,040 W
2 Magnetometers (XEN 1210)	0,031 W	100 %	0,031 W
FPGA	0,049 W	100 %	0,049 W
2 SMDH ICs	0,030 W	100 %	0,030 W
Langmuir Probe	0,930 W	100 %	0,930 W
Attitude Determination System	0,271 W	100 %	0,271 W
SDATF			
TOTAL			2,25 W

Utilizando os dados e resultados encontrados através do código em Matlab, seção 4.3, onde a geração média de potência é 2.29 W, é apresentado o balanço de potencia da Tabela 4, onde o ciclo de trabalho da sonda de Langmuir foi aumentado em relação a correção inicial, Tabela 8. No entanto, a sonda de Langmuir ainda não pode operar com o ciclo de trabalho máximo, Tabela 6, pois é importante considerar cerca de 12,5% do valor de geração para carregar as baterias e assegurar os níveis de tensão de segurança nas mesmas. Com isso, a sonda ficará ativa em 73,4% do período orbital, ou seja, 70 minutos e 46 segundos.



Tabela 8: Balanço de Potência com as correções finais.

Components	Maximum Consumption	Duty Cycle	Consumption with duty cycle
Electric Power Subsystem	0,249 W	100 %	0,249 W
Board Computer	0,380 W	100 %	0,380 W
Receptor (TRXUV RX)	0,237 W	100 %	0,237 W
Transmitter (TRXUV TX)	0,787 W	4,2 %	0,033 W
Antenna System	0,040 W	100 %	0,040 W
2 Magnetometers (XEN 1210)	0,031 W	100 %	0,031 W
FPGA	0,049 W	100 %	0,049 W
2 SMDH ICs	0,030 W	100 %	0,030 W
Langmuir Probe	0,800 W	73,4 %	0,683 W
Attitude Determination System	0,271 W	100 %	0,271 W
SDATF			
TOTAL			2,003 W

CAPÍTULO 6

PRINCIPAIS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS

No período de Agosto de 2018 a Julho de 2019 algumas tarefas foram realizadas, entre elas:

- Estudo e análise dos subsistemas elétricos e eletrônicos que compõem o *BUS* e o *Payload* do NANOSATC-BR2;
- Estudo sobre o condicionamento de energia através de conversores de sistemas elétricos de potência de nanossatélites da classe CubeSat;
- Projeto de conversores rebaixadores de tensão para a aplicação em condicionamento dos níveis de tensão dos barramentos de nanosatélites, tendo como fonte alimentadora bateria de lítio.
- Estudos sobre geração de energia em ambiente espacial através de simulações;
- Desenvolvimento do Balanço de Potência do NANOSATC-BR2 refinado através do código em Matlab, bem como medidas que devem ser adotadas para assegurar o sucesso da missão no quesito energético.
- Apresentação em congresso nacional, “*VII Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia*”, de um trabalho referente ao estudo realizado no presente relatório. Trabalho intitulado como: “*ESTUDO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA PARA SATÉLITES COM ÊNFASE EM NANOSATÉLITES DA CLASSE CUBESATS E DESENVOLVIMENTO DO BALANÇO DE POTÊNCIA DO NANOSATC-BR2*”.



CAPÍTULO 7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho desenvolvido pelo bolsista no período de vigência da bolsa (Agosto de 2018 até Julho de 2019) contribui significativamente para a compreensão do funcionamento de sistemas elétricos espaciais e suas formas de operação, especialmente para o nanossatélite NANOSATC-BR2 do Programa NANOSATC-BR, Desenvolvimento de CubeSats. Os estudos sobre condicionamento de energia juntamente com conceitos que o aluno utilizou durante toda a sua graduação nas disciplinas do curso de Engenharia Elétrica possibilitaram o projeto de conversores rebaixadores de tensão para níveis de tensões utilizados em CubeSats. Além disso, a relação dos conteúdos estudados foi de suma importância na realização do Balanço de Potência, tendo em vista que os componentes e seus consumos de potência foram estudados e então relacionados com os estudos e análises de geração de energia elétrica em ambiente espacial.

Através do Balanço de Potência refinado pelo código em Matlab, foi possível aumentar o tempo de operação da Sonda de Langmuir, se comparado ao Balanço de Potência com resultados teóricos. As alterações respeitaram as faixas de segurança para funcionalidade do NCBR2 no quesito energético, essa medida proposta pelo aluno foi acatada pelos desenvolvedores da carga útil para que o Balanço de Potência seja positivo e não gere problemas de suprimento de energia nem danos nas baterias.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PATEL, M. R. *Spacecraft Power System*. CRC PressINC, New York, 2005.
- [2] MOÇAMBIQUE, N. E. M. *Aplicação de Algoritmos de Busca do ponto de Máxima potência e controladores lineares e/ou Fuzzy para a regulação da tensão terminal de Painéis Fotovoltaicos*. Dissertação de Mestrado da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- [3] RASHID, M. H. *Eletrônica de Potência, Circuitos, Dispositivos e Aplicações*. MAKRON Books, São Paulo, 1999.
- [4] DURÃO, O. S. C., SCHUCH, N. J., et. al. **Documento Preliminar de Revisão - Status de Engenharias e Tecnologias Espaciais do Projeto NANOSATC-BR – Desenvolvimento De CubeSats**. Documento apresentado à AEB. Maio 2011;
- [5] COSTA, R. L. **GERAÇÃO E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA PARA O SATÉLITE NANOSATC-BR**. 2009. 48p. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.
- [6] BROWN , JONATHAN., MUNAKATA, RIKI., **Dnepr 2 Satellite Identification and the Mk.III P-POD**, CubeSat Developers' Workshop, San Luis Obispo, CA, USA, 09 de Abril de 2008;
- [7] GOMSPACE. *NanoPower P-series Datasheet P31 V6.1*. Denmark, 2012.
- [8] LYNN, P. A. *Electricity from Sunlight: An Introduction to Photovoltaics*. John Wiley & Sons Ltd, Imperial College London, 2010.
- [9] VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R.; RUPPERT FILHO, E. *Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays*. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 24, NO. 5, MAY 2009.